



TITLE:

Study of magnetic shaping effects on plasma flows and micro-instabilities in tokamak plasmas using the full-f gyrokinetic code based on a real space field solver(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Kevin, Obrejan

CITATION:

Kevin, Obrejan. Study of magnetic shaping effects on plasma flows and micro-instabilities in tokamak plasmas using the full-f gyrokinetic code based on a real space field solver. 京都大学, 2017, 博士(エネルギー科学)

ISSUE DATE:

2017-09-25

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k20727>

RIGHT:

許諾条件により本文は2018-10-01に公開; 許諾条件により要旨は2018-10-01に公開

(続紙 1)

京都大学	博士（エネルギー科学）	氏名	Kevin Obrejan
論文題目	Study of magnetic shaping effects on plasma flows and micro-instabilities in tokamak plasmas using the full-f gyrokinetic code based on a real space field solver (場に対する実空間ソルバーに基づく full-f ジャイロ運動論コードを用いたトカマクプラズマのプラズマ流と微視的不安定性における磁場形状効果の研究)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、トカマク型装置を中心とした磁場核融合プラズマの磁気面形状が閉じ込めや輸送現象に与える影響を明らかにすることを目的に、その効果を取り入れた大域的ジャイロ運動論モデルに基づく新たなコードの開発を行うとともに、そのコードを用いたプラズマ中の流れ場や揺らぎに対する非円形断面形状効果についてのシミュレーション研究とそれに基づく理論研究を行った結果をまとめたものであり、6章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、核融合プラズマ研究の現状と世界的な動向全般に関する紹介と、トカマク型装置を中心とした磁場閉じ込め核融合プラズマで現出する時空間スケールの異なった様々な現象を記述する基本的な理論モデルの概要が簡潔に述べられている。また、本論文の主題であるプラズマの閉じ込めや輸送過程に重要な役割を果たす流れ場と微視的不安定性に対する磁気面形状の効果や役割を解明することの重要性とそのための手段等が論じられている。</p> <p>第2章では、微視的不安定性とそれによって引き起こされる異常輸送現象を研究するための基本的な理論的枠組である、非正準 Lie 変換によって導出された位相空間 5 次元のジャイロ運動論モデルについて説明している。また、これらの過程に重要な役割を果たす有限ラーモア半径 (FLR) 効果をはじめとした重要な物理過程を議論するとともに、これまで、世界で開発されてきたジャイロ運動論コードを、数値スキームや理論モデルの観点から分類し、解説している。</p> <p>第3章では、本論文で新たに開発した大域的ジャイロ運動論コードの概要について議論されている。本章では、保存型数値スキームを用いた空間微係数の差分化や、自動時間刻み幅制御による時間積分法に加え、本論文で新たに提唱した、2 次元ポロイダル断面に補関関数を形成することにより、FLR 効果をジャイロ軌道に沿って厳密に評価する計算方法について詳細に解説している。また、その手法の利点として、従来の Pade 近似（長波長近似）を用いることなく、様々な揺らぎの構造を、短波長を含む広大域波長領域で高精度に再現・評価することが可能であること、フーリエ変換を用いる必要がないため任意の磁気面形状に対応可能であることが議論され、本研究目的であるプラズマ中の流れ場や揺らぎに対する磁気面形状効果を調べる上でのコードの意義が示されている。さらに、固定点法における加速係数の最適化による行列計算の高速化や 5 次元領域分割を用いた MPI 並列化など、大規模シミュレーションでは欠かせないコードの高速化についても論じている。</p>			

第4章では、第3章で述べた大域的ジャイロ運動論コードを用いて、楕円度および三角度を持つ非円形断面トカマクにおいて振動する測地線音波モード(GAM)の減衰、および振動しない残留成分である帯状流の解析を行っており、楕円度の増大に対して GAM の減衰率と残留振幅は共に増加することを明らかにしている。また、負値(逆 D 型)を含む三角度に対する GAM の減衰率と残留振幅の依存性を調べ、残留振幅は三角度の増大に対して緩やかに増大する一方、減衰率は三角度が負値である逆 D 型配置でも正值同様に増大することを示している。さらに、三角度に対する減衰率の安全係数の依存性を調べ、安全係数が大きいほど三角度の絶対値の増大に対する減衰率の増大効果は大きいことを議論している。この三角度に対する GAM 特性は大域的なジャイロ運動論モデルで初めて解析された結果であり、楕円度に加え、三角度による流れ場の制御の可能性を示唆している。

第5章では、磁気面形状として重要な楕円度と三角度がイオン温度勾配(ITG)モードに与える影響について述べており、楕円度の増大に対して ITG モードの成長率は減少するとともに、最も不安定なポロイダルモード波数は増大すること、さらに混合長理論から予測される熱輸送係数は楕円度の 2 乗に反比例することを明らかにしている。この依存性は、従来の局所的モデルで示された依存性よりも強く、大域的效果の中でも特に力学的平衡から自己無頓着に決定される径電場によって楕円度による安定化効果が増幅される可能性を示している。一方、三角度は、その値が正の場合は ITG モードが不安定化するのに対して、負の場合は安定化に作用し、逆 D 型配位による ITG モード駆動型のイオン系乱流輸送低減の可能性を初めて示している。

第6章では、プラズマ流と ITG 不安定に対する磁気面形状効果について解析した主な成果を要約するとともに、核融合プラズマの高性能化の観点から今後の課題について述べている。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、トカマク型装置を中心とした磁場核融合プラズマの磁気面形状が閉じ込めや輸送に与える影響を明らかにすることを目的に、その効果を取り入れた大域的ジャイロ運動論モデルに基づく新たなコードの開発とそれを用いたプラズマ中の流れ場や揺らぎに対する非円形断面形状効果の理論・シミュレーション研究を行った結果をまとめたものであり、得られた主要な成果は次の通りである。

- 1) 円形磁気面をフーリエ変換で扱ったこれまでの大域的ジャイロ運動論コードに対して、任意の非円形磁気面に対応可能な矩形メッシュを用いたコードを新たに開発した。その結果、揺らぎの構造を左右する有限ラーモア半径効果に対して、実空間に補間関数を導入することにより、Pade 近似を用いることなく、様々な揺らぎの構造を、広大域波長領域で高精度に再現・評価することが可能になった。
- 2) 開発したコードを用いて、非円形断面トカマクの測地線音波モード(GAM)の減衰と帯状流の解析を行った。その結果、楕円度の増大に対して GAM の減衰率と帯状流は共に増加することをはじめて確認した。また、負値(逆 D 型)を含む三角度に対する GAM の減衰率と帯状流の依存性を調べ、帯状流は三角度の増大に対して緩やかに増大する一方、減衰率は逆 D 型配置でも増大することを明らかにした。さらに、三角度に対する減衰率の安全係数依存性を調べ、その値が大きいほど三角度の絶対値の増大に対する減衰率の増大効果は大きいことを示した。この三角度に対する GAM 特性は大域的なジャイロ運動論モデルで初めて解析された結果であり、楕円度に加え、三角度による流れ場の制御の可能性を示唆している。
- 3) 非円形磁気面がイオン温度勾配(ITG)モードに与える影響を調べた。その結果、楕円度の増大に対して ITG モードの成長率は減少すること、最も不安定なポロイダルモード波数は増大すること、混合長理論から予測される熱輸送係数は楕円度の 2 乗に反比例することなどを明らかにした。一方、三角度は、その値が正の場合、ITG モードが不安定化するのに対して、負の場合は安定化に作用し、逆 D 型配位による ITG モード駆動型のイオン系乱流輸送低減の可能性を初めて示した。

以上の研究は、当該分野のシミュレーション研究が世界的に進展する中、磁気面形状効果を導入可能な大域的ジャイロ運動論コードの有用性と磁気面形状による流れ場や揺らぎの制御方法の可能性を示すものであり、核融合プラズマの閉じ込め・輸送の理解の進展に資するものである。

よって、本論文は博士(エネルギー科学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 29 年 9 月 1 日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。

論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文の全文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 2018 年 10 月 1 日以降